



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO  
SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM  
ENGENHARIA QUÍMICA



# Aproveitamento energético do resíduo de óleo de palma

*Autor: Diogo da Rosa dos Santos*

*Orientadora: Prof<sup>ta</sup>. Doutora Caroline Borges Agustini*

Porto Alegre

2022



Autor: Diogo da Rosa dos Santos

## Aproveitamento energético do resíduo de óleo de palma

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química*

Orientadora: Profa. Doutora Caroline Borges Agustini

Banca Examinadora:

Prof<sup>ª</sup>. Doutora Luciane Ferreira Trierweiler, UFRGS

Msc. Débora Gonçalves Carvalho, UFRGS

Porto Alegre

2022

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por me darem todo o apoio necessário, pela educação e carinho.

À Laura Quevedo, pelo amor incondicional, pelos dias difíceis, quando se manteve ao meu lado e pela nossa eterna união.

À minha família, por me oportunizar momentos felizes e pelo apoio.

À minha orientadora Dra. Caroline Borges Agustini, pela proposição do tema e pela presteza que teve durante a realização deste trabalho.

## RESUMO

O óleo de palma é a maior fonte de óleo vegetal e de emprego para muitas famílias em áreas rurais de países principalmente do continente asiático, tais como Indonésia, Malásia, Tailândia, Vietnã, Filipinas, Camboja. Na América Central, América do Sul e no continente africano também é possível observar a importância do óleo de palma. A indústria de óleo de palma gera uma enorme quantidade de resíduos, tais sólidos, líquidos e gasosos. O tema do presente trabalho é o aproveitamento do resíduo de óleo e palma. Em virtude da quantidade abundante da produção do óleo de palma, existe um grande potencial para esse ser utilizado como uma fonte de energia renovável através da conversão em outros produtos energéticos. Sob esse aspecto, este trabalho tem como objetivo mapear as alternativas tecnológicas para a conversão de energia do resíduo do óleo de palma e dos resíduos da sua produção. Com base nisso, o trabalho é estruturado a partir de uma análise em três níveis a partir de uma base de artigos científicos selecionados. O primeiro nível da metodologia corresponde a uma análise espaço-temporal da produção científica mundial do estudo do tema. O segundo nível diz respeito à definição das taxonomias a serem avaliadas nos artigos científicos. O terceiro nível visa aprofundar o entendimento das taxonomias previamente definidas. Os aproveitamentos energéticos abordados neste estudo são biogás, biodiesel, etanol e eletrólise. Dentre os diversos resultados obtidos, verifica-se a utilização majoritária de biogás a partir do óleo de palma e uma maior quantidade de estudos de autores da Malásia. Além disso, constatou-se que grande parte dos estudos do estado tecnológico pertence à Academia. Pode-se perceber que as temperaturas utilizadas nos estudos avaliados de biogás se encontram majoritariamente na faixa de temperatura mesofílica. Por outro lado, constatou-se que a co-digestão implica em um aumento de produção de biogás de 30% quando se utiliza o efluente líquido da produção do óleo de palma e o seu resíduo sólido. A técnica da eletrólise aplicada ao aproveitamento do resíduo do óleo de palma gerou um volume de biogás de 32 L.

**Palavras-chave:** óleo de palma; aproveitamento energético; biogás; co-digestão.

## ABSTRACT

Palm oil presents itself as the biggest source of vegetable oil and employment for many families in rural areas of countries mainly on the Asian continent, such as Indonesia, Malaysia, Thailand, Vietnam, Philippines, Cambodia. In Central America, South America and in the African continent it is also possible to observe the importance of palm oil. As for the use of this range, there is a wide range of possibilities, which are relevant to food industry, to the steelmaking processes for the manufacture of steel sheets and tinplate and for tempering steels, as well as for civil construction. Even lubricating oil and its by-products can be combined into building concrete combinations and their combined asphalts can be combined into building material combinations. Palm oil processing starts with the steam sterilization stage and goes to the physical or chemical refining stage. The palm oil industry generates a huge amount of waste such as waste, liquid, and gaseous waste. The effluent from palm oil processing is like a highly polluted effluent. Commonly, the sludge from the treatment of effluent from the processing of palm oil is sent to the effluent treatment plant to be decomposed or to be treated anaerobically for later provision. Biological with double digestion and treatment alternative low cost compared to other processes such as evaporations and application of heat treatments or physical treatments. Due to the abundant amount of biomass fuel, there is great potential for this palm oil to be used as a renewable energy source through conversion into other energy sources. In this regard, this work aims to evaluate the energy content of palm oil based on 3-level analysis from a selected base of scientific articles. The energy uses studied are biogas, biodiesel, ethanol, and electrolysis. Among the various results obtained, it is possible to see the majority use of biogas from palm oil and a greater number of studies by authors from Malaysia. In addition, it is known that a large part of the studies of the technological state belong to the Academy. It can be seen that the temperatures used in biogas studies are mostly in the mesophilic temperature range. On the other hand, in relation to production management, co-digestion was verified in a 30% increase in biogas when the oil production liquid and its solid residue are used. The electrolysis technique applied to the use of the volume of palm oil is 32 L.

**Keywords:** palm oil; energy utilization; biogas; co-digestion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dendezeiro, fruto da palma e seus constituintes	3
Figura 2 - Processamento do óleo de palma: Produção Simplificada	5
Figura 3 - Fluxograma geral da produção do biodiesel de palma	11
Figura 4 - Quantidade de artigos estudados por ano	14
Figura 5 - Quantidade de artigos estudados por países	14
Figura 6 - Parâmetros operacionais da produção do biogás	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conjunto de palavras-chave utilizadas	12
Tabela 2 - Taxonomias da análise meso	15
Tabela 3 - Normalização dos volumes de biogás	21



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSTR = *continuous stirred-tank reactor*

EFB = *Empty fruit bunch*

POME = Palm Oil Mill Effluent

UASB = Upflow Anaerobic Sludge Blanket

DQO = demanda química de oxigênio

DBO = demanda biológica de oxigênio

%v/v = Porcentagem por volume (% V/V)

%m/m = Porcentagem por massa (% m/m)

ASBR = Anaerobic Sequencing Batch Reactor

TRH = tempo de retenção hidráulico

## SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	Produção e utilização do óleo de palma	2
2.2	Destinação dos resíduos do óleo de palma	5
2.3	Aproveitamento energético do óleo de palma	6
2.3.1	Produção de biogás a partir do óleo de palma	8
2.3.2	Produção de biodiesel a partir do óleo de palma	9
2.3.3	Produção de etanol a partir do óleo de palma	9
2.3.4	Produção de biogás a partir da eletrólise	11
3	Materiais e Métodos	12
3.1	Estratégias de buscas	12
3.2	Análise Macro	12
3.3	Análise Meso	122
3.4	Análise Micro	133
4	Resultados	14
4.1	Resultados da Análise Macro	14
4.2	Resultados da Análise Meso	155
4.3	Resultados da Análise Micro	15
4.3.1	Aproveitamento Energético	15
4.3.1.1	Biogás	15
4.3.1.2	Biodiesel	18
4.3.1.3	Eletrólise	19
4.3.1.4	Etanol	19
4.3.2	Volume de reator	20
4.3.3	Temperatura de processo	22
5	Conclusões e trabalhos futuros	24
	REFERÊNCIAS	25

## 1 Introdução

As mudanças climáticas globais causadas pelos gases de efeito estufa e principalmente pelas emissões de dióxido de carbono têm causado alterações significativas nos ecossistemas em todo o mundo. Fontes mais verdes de energia estão sendo cada vez mais exigidas como uma alternativa para substituir os combustíveis fósseis. Esses combustíveis, ao serem utilizados de forma intensiva e ineficiente, implicam uma redução drástica das suas reservas mundiais. A preocupação com o esgotamento do combustível fóssil levou a um aumento das atividades de pesquisa sobre o desenvolvimento de energias renováveis como a produção de biogás a partir de resíduos para geração sustentável de energia. O efluente de fábrica de óleo de palma (POME) é um resíduo com alto conteúdo de carbono orgânico e tornou-se uma fonte promissora para a produção de biogás. As principais fontes de energia vêm de combustíveis fósseis compostos por petróleo (35%), carvão (29%) e gás natural (24%) (Ahmad *et al.*, 2016).

O óleo de palma é um óleo comestível importante que é consumido globalmente. Seu processo de extração gera um resíduo líquido comumente chamado de efluente de fábrica de óleo de palma. O POME é considerado um efluente altamente poluente, no entanto, a reutilização desse efluente gera energias renováveis em escala comercial e com grande potencial. (Kee Lam e Lee, 2016). A digestão anaeróbia é amplamente adotada na indústria como tratamento primário para o POME. O efluente é indesejável, mas inevitável e apesar de poder ser reaproveitado, ainda é um desafio para os produtores (Chong e Poh, 2009).

No presente trabalho é apresentado um panorama acerca das possibilidades de aproveitamento energético do óleo de palma. Em virtude disso, realiza-se um *Roadmap tecnológico* com a finalidade de entender quais são as melhores práticas para se avaliar o objeto de estudo.

O objetivo desse trabalho é avaliar de que modo o óleo de palma e os resíduos gerados durante a sua produção podem ser úteis para a geração de energia. Para tanto, busca-se entender quais são os países os quais fornecem estudos direcionados a esse tema, quais são os melhores parâmetros operacionais e quais os tipos de aproveitamento energético que os autores se propõem a obter.

## 2 Revisão Bibliográfica

O presente capítulo objetiva introduzir os principais conceitos acerca do óleo de palma, da sua produção, da sua utilização, da destinação dos seus resíduos, do seu aproveitamento energético para as produções de biogás, de biodiesel, de etanol e de biogás via eletrólise.

### 2.1 Produção e utilização do óleo de palma

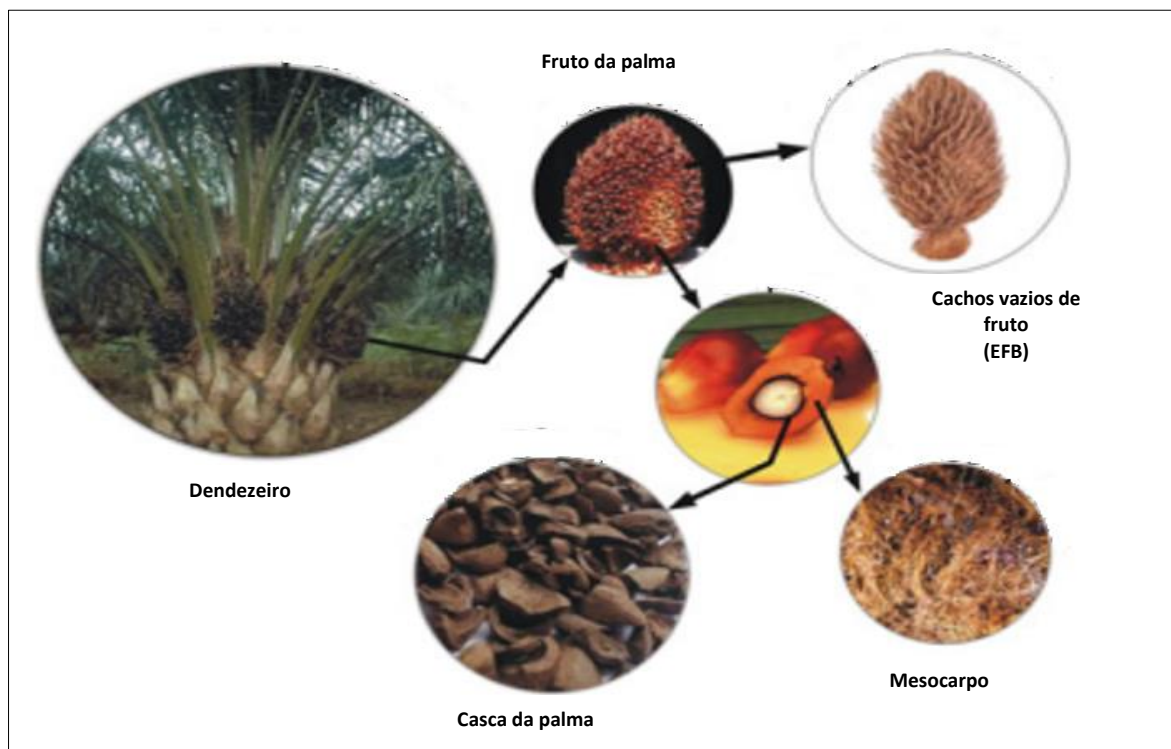
O óleo de palma é a maior fonte de óleo vegetal e de emprego para muitas famílias em áreas rurais da Indonésia, Malásia, Tailândia, Colômbia, Nigéria, Vietnã, Filipinas, Papua Nova Guiné, Camboja, Honduras, Guatemala, Costa Rica, Camarões, Libéria, Senegal, Equador e Brasil. Os principais produtores de óleo de palma são a Indonésia e a Malásia (Foreign Agricultural Service, 2016). Globalmente, o óleo de palma é utilizado nas indústrias de alimentos, em produtos cosméticos e em biocombustíveis, os quais respectivamente correspondem a 68%, 27% e 5% do uso desse óleo. Em 2018, o mundo produziu 72 milhões de toneladas de óleo de palma. A Indonésia foi responsável por 57% dessa produção e a Malásia produziu 27%. Cabe destacar que 84% da produção global de óleo de palma vêm da Indonésia e da Malásia (Ritchie *et al.*, 2020).

A maior parte do consumo global de óleo de palma bruto é de plantações de monocultura em grande escala, e isso é desencadeado pelo aumento da demanda global, particularmente de economias emergentes, tais como China, Índia (Wilcove e Koh, 2010) e países da União Europeia (Kremen *et al.*, 2012; Villela *et al.*, 2014). O sudeste da Ásia é a principal região de produção de óleo de palma; no entanto, percebe-se a ascensão de plantações comerciais na América Latina e no oeste do continente africano. Na América do Sul, a Colômbia desponta como principal país produtor de palma no continente, e o quarto a nível Mundial, logo depois da Malásia, Indonésia e Nigéria. O cultivo de óleo de palma tem progredido significativamente na Colômbia: na década de 60, existiam aproximadamente 18 mil hectares de produção; no ano de 2003, cerca de 188 mil hectares; atualmente são cerca de 300 mil hectares. Do total da produção de óleo de palma, cerca de 35% são exportados. A meta que o plano nacional colombiano pretende atingir referente ao avanço da agroindústria do óleo de palma é de 830 mil hectares plantados. No Brasil, o governo brasileiro lançou, em 2010, o Programa de Produção Sustentável da Palma de Óleo no país com o objetivo de incentivar o desenvolvimento e, ao mesmo tempo, garantir que a produção de óleo de palma não prejudique a Floresta Amazônica, uma vez que o programa contempla o mapeamento das áreas que podem ser usadas para o cultivo e a restrição do desmatamento. O estado do Pará é

o principal polo produtor de óleo de palma na Amazônia. O crescimento de área plantada com dendezeiro entre 1991 e 2010 foi de 39,6 mil hectares (Glovatski e Raiher, 2013), e a tendência é de que, para o ano de 2020, a utilização de áreas desmatadas e degradadas seja equivalente a 330 mil hectares (Carvalho *et al.*, 2015). Salienta-se que o Brasil apresenta um clima favorável ao plantio da palma oleaginosa, uma vez que esta cultura se desenvolve bem em climas tropicais (quentes e úmidos) (AGROMUNDO, 2011; BRASIL ECODIESEL, 2010).

O fruto da palma (dendê) produz dois tipos de óleo: óleo de dendê ou de palma (*palm oil*, como é conhecido no mercado internacional), extraído da parte externa do fruto, o mesocarpo; e óleo de palmiste (*palm kernel oil*), extraído da semente, similar ao óleo de coco e de babaçu (EMBRAPA, 2010). A Figura 1 mostra o dendezeiro, o fruto da palma e seus componentes.

Figura 1: Dendezeiro, fruto da palma e seus constituintes



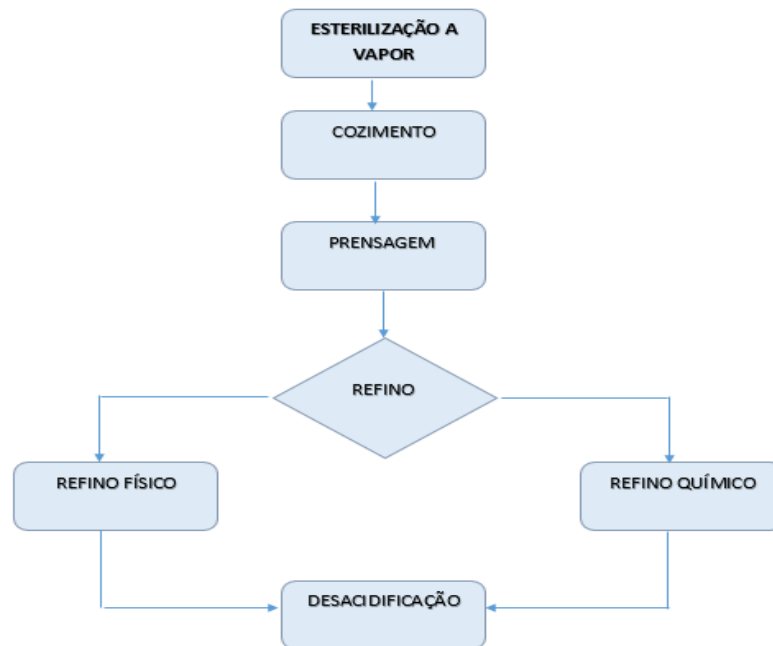
Fonte: elaboração própria

O processamento do óleo de palma se inicia através da esterilização a vapor, na qual o cacho do dendê, logo depois do corte e transporte, é submetido à temperatura de 100 °C para ser cozido. Em altas temperaturas, certos componentes dentro do óleo, especialmente os componentes bioativos e antinutrientes, serão destruídos (Omar *et al.*, 2017). Após o cozimento, ocorre a separação do fruto do cacho com um debulhador mecânico (Costa, 2015).

Durante a prensagem, o óleo de palma bruto é drenado do mesocarpo fibroso, deixando para trás materiais fibrosos que ainda retêm cerca de 5 a 6% do óleo. Para evitar rachaduras no palmiste, a pressão é normalmente reduzida e a retenção de óleo aumenta para uma faixa em torno de 10-12%. O licor de prensagem resultante é uma mistura de água, óleo, sujeira e restos de frutas em concentrações variadas. O licor é processado para maximizar o rendimento de óleo e reduzir o teor de umidade no óleo de palma bruto (Mba *et al.*, 2015).

Os cachos vazios são coletados para serem usados como fertilizante ou serem secos antes de serem alimentados em caldeiras. Em linhas gerais, a extração do óleo de palma ocorre via extração mecânica através da prensagem dos frutos por uma prensa que opera de modo contínuo para a retirada do óleo do mesocarpo carnoso (Franz, 2020). Com o objetivo de remover alguns compostos indesejáveis, tais como ácidos graxos livres, pigmentos, ceras e metais pesados, os quais afetam a qualidade do óleo, é necessário que o óleo de palma seja refinado antes do seu consumo. O refino pode ser por via química, com a utilização de soda cáustica, ou por via física, através das etapas sequenciais de branqueamento e desacidificação. O refino químico tem por objetivo converter ácidos graxos livres em sabões, uma vez que ele utiliza hidróxido de sódio para neutralização durante a etapa de desacidificação do óleo. Os sabões são removidos, posteriormente, por meio de centrifugação ou decantação. Embora o refino químico apresente inúmeras desvantagens, ele ainda é utilizado em diversas indústrias, uma vez que a diminuição do teor de ácidos graxos livres atinge o nível desejado. O refino físico se inicia através da etapa de branqueamento cujo objetivo é promover a redução do teor de fosfolipídios; dessa forma, evita-se que o óleo sofra um escurecimento ao ser submetido às altas temperaturas utilizadas nas etapas subsequentes. Nesse tipo de refino, os ácidos graxos livres são removidos por destilação a vácuo sob alta pressão de vácuo. Além disso, reduz-se o teor de compostos com cor e de outros contaminantes. Cabe destacar que o refino físico proporciona um maior rendimento de óleo neutro e usa menos reagentes químicos e água o que causa um menor impacto ambiental. Logo após a etapa de branqueamento, ocorre a etapa de desacidificação, a qual se caracteriza por apresentar vácuo elevado, vapor de arraste injetado e temperatura elevada (Silva, 2013). A Figura 2 mostra o processo simplificado do óleo de palma.

Figura 2: Processamento do óleo de palma: Produção Simplificada



Fonte: elaboração própria

Quanto à utilização do óleo de palma, ele possui uma vasta gama de possibilidades de utilização. Na indústria alimentícia, pode ser usado na fabricação de barras de chocolate, sorvetes, refeições prontas congeladas, margarinas, molhos para salada etc. (Mba *et al.*, 2015). É empregado nos processos siderúrgicos de fabricação de folhas de aço e chapas de flandres e para têmpera dos aços. Além disso, na construção civil, o óleo de palma e seus subprodutos podem ser efetivamente usados como alternativas sustentáveis inovadoras em materiais da construção verde, melhorando o desempenho do asfalto e do concreto (Al-Sabaei *et al.*, 2022).

## 2.2 Destinação dos resíduos da produção do óleo de palma

A indústria de óleo de palma gera uma enorme quantidade de resíduos, tais como resíduos sólidos, resíduos líquidos e gasosos. O POME tornou-se o principal poluente contribuído pelas fábricas de óleo de palma quando lançado no meio ambiente, pois degrada a qualidade da água e, portanto, a água não pode ser lançada diretamente no meio ambiente. O POME é rico em sólidos, óleos e graxas e possui alto teor orgânico (Mohammad *et al.*, 2021). Contém vários metais pesados em quantidades significativas. Além disso, durante o processo de tratamento biológico, gases nocivos como metano, dióxido de enxofre e amônia são liberados

para a atmosfera. A introdução de POME sem tratamento tende a causar uma redução significativa da diversidade aquática e distúrbios fisiológicos em peixes. Portanto, é importante tratar o efluente no seu melhor grau antes de despejá-lo no meio ambiente para evitar impactos na saúde humana e na poluição (Soo *et al.*, 2022).

A característica do POME depende da qualidade do material de partida e do processo de produção de óleo de palma bruto. POME é um líquido marrom espesso que é descarregado em alta temperatura variando de 80 a 90°C com baixo pH de 3,3 a 5,7. O efluente é um importante poluente para o meio ambiente devido ao seu alto teor de DBO (10.250-43.000 mg/L), DQO (15.000-100.000 mg/L), óleo e graxa (130-18.000 mg/L). Além disso, o POME bruto também contém grande quantidade de sólidos totais (46.304–63.192 mg/L), nitrogênio total (670 a 780 mg/L) e quantidade significativa de fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg) e cálcio (Ca) (Soo *et al.*, 2022).

A digestão anaeróbica é o método altamente recomendado para o tratamento de efluentes de alta resistência como o POME que contém uma alta concentração de matéria orgânica. Os biorreatores anaeróbios de alta taxa, como o reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), a filtração anaeróbica de fluxo ascendente e reatores de leito fluidizado são amplamente aplicados no sistema de tratamento POME em escala laboratorial. Atualmente, o processo biológico também é comum para o tratamento de POME utilizando sistemas aeróbicos e anaeróbicos (Soo *et al.*, 2022).

As borras de neutralização do óleo de palma provenientes da etapa do refino químico são resíduos agroindustriais cujo valor agregado é baixo e que constituem geralmente de 5 a 10% da massa de óleo bruto. As borras neutralizadas podem ser utilizadas diretamente na fabricação de sabões. O uso desses subprodutos como matéria-prima na geração de biocombustíveis vem se tornando mais atrativo para a indústria de biodiesel e de biogás, por ser uma fonte consumidora deste subproduto, uma vez que a remoção dos ácidos graxos livres durante a preparação da matéria-prima é indispensável (Santos, 2015).

### **2.3 Aproveitamento energético do óleo de palma e de seus resíduos**

De acordo com Sumathi *et al.* (2007), a quantidade abundante de resíduo de biomassa do óleo de palma pode potencialmente ser usada como uma fonte de energia renovável através da conversão em outros produtos energéticos, como os biocombustíveis. O uso da biomassa em outras formas de produtos energéticos é mais benéfico do que a queima direta de biomassa, pois essa libera muitos poluentes no ar.



Uma técnica potencial para aliviar essas preocupações ambientais é converter resíduos do óleo de palma em bio-óleo e biochar através da pirólise. De acordo com a literatura, a pirólise é sugerida como um método ambientalmente sustentável, pois não há desperdício durante o processo. O bio-óleo é o principal produto da pirólise, porque é tipicamente obtido em rendimentos maiores do que os outros produtos. O bio-óleo é formado a partir da condensação de vapor e, para a pirólise de biomassa de óleo de palma, os vapores são geralmente liberados a uma temperatura de 400 a 550 °C (Promraksa *et al.*, 2020). Para aplicações químicas, o bio-óleo pode ser usado para produzir produtos químicos úteis, aproveitando os seus mais abundantes grupos funcionais, como carbonila, carboxila e grupos fenólicos, através de técnicas de reação ou separação. Com relação ao biochar, embora o seu rendimento como um dos produtos do processo de pirólise seja aproximadamente 15-25%. Ele pode ser utilizado como um combustível altamente eficiente em caldeiras ou como uma mistura com biomassa devido ao seu alto poder calorífico superior (PCS) resultante dos poderes caloríficos superiores da casca da palma, dos cachos vazios e das fibras do mesocarpo que, respectivamente, correspondem a 28,85 MJ/kg, 21,34 MJ/kg e 29,06 MJ/kg (Abnisa *et al.*, 2013).

As misturas do óleo de palma com o óleo diesel visam obter um óleo que apresente um desempenho suficientemente próximo ao do diesel. A obtenção de bons resultados através da neutralização do óleo de palma viabilizou os estudos com misturas de óleo de palma neutralizado com óleo diesel e álcool anidro nas instalações da Embrapa Amazônia Oriental, em Belém do Pará, no 1º semestre de 2003. A avaliação da viabilidade técnica dessa mistura permitiu concluir que somente a mistura contendo 5% de óleo de palma é viável tecnicamente, o que justifica a continuidade das pesquisas acerca do desempenho e da durabilidade do motor estacionário e de seu sistema de injeção (Júnior *et al.*, 2004).

O óleo de palma tem sido bastante utilizado na geração de energia elétrica em locais isolados onde o custo envolvido na logística do óleo diesel é elevado, o que inviabiliza a adoção do sistema convencional de geração (Silva, 1997). Essa energia é gerada pela queima dos resíduos das frutas de palma, fibras e casca em uma caldeira para a produção de vapor saturado ou superaquecido. Metade desse vapor é usado no processo de moagem, como esterilização, armazenamento de grãos etc. Na Malásia, a biomassa de óleo de palma contribui com mais de 40 MW de capacidade conectada à rede, muito à frente de outras tecnologias renováveis, incluindo 4,95 MW de biogás, 12,5 MW de pequenas hidrelétricas, 5 MW de fontes de resíduos sólidos e 2,5 MW de energia solar (Umar *et al.*, 2014).

### 2.3.1 Produção de biogás a partir do óleo de palma e de seus resíduos

Segundo Pornwimon *et al.* (2021), o biogás tornou-se uma fonte de energia renovável e sustentável em muitos países, principalmente naqueles com abundância de matérias-primas. A produção de biogás é baseada no processo de digestão anaeróbica, que pode ser classificada em digestões no estado líquido e no estado sólido, dependendo do teor de sólidos totais (TS) da mistura nos digestores. A digestão anaeróbica em estado sólido é atribuída quando o teor de TS é superior a 15%. A digestão anaeróbica no estado líquido ocorre no teor de TS entre 0,5% e 15%.

Na Malásia, o Pome é geralmente tratado por uma série de lagoas, embora algumas instalações usem a digestão anaeróbica. A principal desvantagem da digestão anaeróbica é a relativa taxa de degradação lenta do substrato. O tempo típico de residência do substrato em digestores convencionais é de cerca de três semanas ou mais, dependendo do tipo de substrato e das condições de operação (Isa *et al.*, 2020).

Os cachos vazios de fruto de palma (EFB) podem ser utilizados como uma fonte de energia renovável para a produção de biogás devido ao fato de ter um alto teor de orgânicos. A co-digestão de EFB e de POME em uma única etapa de tratamento simplificaria os requisitos técnicos e econômicos para a transformação de ambos os resíduos em biogás. No entanto, a biodegradabilidade do EFB é baixa devido à sua composição lignocelulósica e precisa ser significativamente melhorado antes da sua utilização para a produção de biogás de forma eficiente (O-Thong *et al.*, 2012).

O POME descarregado do processo de extração do óleo de palma possui uma alta temperatura entre 70°C a 80 °C. Ele deve ser resfriado a uma temperatura de cerca de 40 °C para a produção subsequente de biogás afim de que se evite a falha do sistema dessa produção. Além disso, a alta temperatura do POME é tóxica para bactérias mesófilas. Dessa forma, o processo de resfriamento é geralmente realizado em grandes lagoas abertas para lidar com a alta taxa de POME (cerca de 400-500 m<sup>3</sup>/dia). Isso causa uma perda crucial de energia e aumento de custo. Além disso, a perda de matéria orgânica durante o resfriamento do processo é estimada em mais de 20%, causando a diminuição do rendimento de biogás. Na digestão anaeróbia, geralmente há dois intervalos de temperaturas: (i) digestão mesofílica entre 20°C e 45°C, mas a faixa convencional é de 35-40°C; e (ii) digestão termofílica entre 45°C e 70°C, mas a faixa convencional é de 55-70°C. A digestão termofílica pode suportar uma maior capacidade de carga e dar um rendimento maior de biogás do que digestão mesofílica. O crescimento dos microrganismos que sintetizam o metano é mais favorecido em condições termofílicas do que as condições mesofílicas. Em termos de análise econômica, a

digestão termofílica foi encontrada para dar um lucro líquido maior do que a digestão mesofílica significativamente. Dessa forma, a produção industrial de biogás da POME sob as condições termofílicas é economicamente valorizada (Wadchasit *et al.*, 2021).

### 2.3.2 Produção de biogás a partir da eletrólise

O aproveitamento energético através da eletrólise é uma técnica que permite reduzir o tempo de reação na produção de biogás. O plasma de descarga dielétrica, utilizado neste método, é gerado por descargas elétricas em íons líquidos, produzindo espécies ativas que são radicais oxidantes ( $H\cdot$  e  $\cdot OH$ ) e moléculas ( $H_2O_2$  e  $O_3$ ) para aumentar a taxa cinética química. Essas espécies e moléculas reagentes são eficazes na degradação de compostos orgânicos em POME (Budiman e Wu, 2016; Hazmi *et al.*, 2017). Zeng *et al.* (2018) investigaram a combinação de plasma DBD com catalisador Ni-/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a 160°C. Os resultados mostraram que a combinação do plasma com catalisadores baseados em Níquel agravou a conversão de metano, o rendimento do hidrogênio e a eficiência energética. Além disso, é possível acelerar a remoção da demanda química de oxigênio (DQO) ao se utilizar a descarga do plasma em barreira dielétrica na produção de biogás.

### 2.3.3 Produção de biodiesel a partir do óleo de palma

O biodiesel é produzido principalmente a partir de recursos naturais não limitados através de um processo de transesterificação. Apresenta diversas vantagens sobre o petróleo, como por exemplo: não é tóxico, é biodegradável, e contém menos poluentes atmosféricos por energia líquida produzida, com reduzido teor de enxofre e aromáticos. (Zahan *et al.*, 2018).

O óleo de palma, por ser um óleo vegetal, não pode ser utilizado diretamente como combustível, uma vez que o seu uso em longo prazo é tanto impraticável quanto insatisfatório devido à alta viscosidade e à formação de ácidos graxos livres, os quais formam uma goma de oxidação, deposição de carbono e polimerização. Dessa forma, o óleo de palma deve ser processado para adquirir propriedades como uma viscosidade semelhante aos combustíveis fósseis. Os principais métodos utilizados são a microemulsificação, a pirólise, e a transesterificação (Deffeys, 2001).

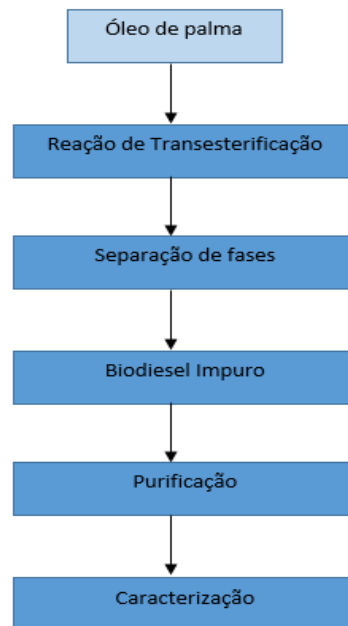
A transesterificação dos triacilglicerídeos é considerada a técnica mais tradicional nos processos de produção do biodiesel. Ela consiste na reação entre álcoois de cadeia curta (metanol ou etanol) e o óleo na presença de catalisador alcalino, enzimas (lípsases) e ácidos, produzindo uma mistura de ésteres de ácidos graxos e glicerol a qual se denomina biodiesel (Carrero *et al.*, 2011).

Na reação de esterificação, um catalisador é empregado para acelerar a reação. Ele pode ser heterogêneo ou homogêneo. Os catalisadores homogêneos são mais utilizados por apresentarem um custo menor, um maior rendimento e por uma maior eficiência, além de apresentarem menores problemas relacionados à corrosão dos equipamentos. No entanto, eles exigem que a matéria-prima seja refinada e geram uma enorme quantidade de efluente a ser tratado, uma vez que apresentam dificuldade na separação, e, dessa forma, são necessárias várias lavagens (Kawashima *et al.*, 2008).

Embora a transesterificação catalisada por ácido seja mais lenta que a reação catalisada por base, a catálise ácida é justificada, uma vez que o contato dos catalisadores alcalinos com os ácidos graxos produz, inconvenientemente, sabões, devido à presença de água e/ou ácidos graxos livres no meio reacional. Essa produção é indesejável, uma vez que promove o aumento da viscosidade, causa a diminuição do rendimento da reação e implica em dificuldade na separação do glicerol, o qual é produto da reação de transesterificação (Soldi *et al.*, 2006).

O uso de catalisadores heterogêneos como catalisadores à base de óxido de cálcio (CaO) tem sido defendido como uma tecnologia promissora, pois, além de acelerarem a reação, mitigam as limitações da transesterificação homogênea, como a geração de águas residuais, baixos níveis de ácidos graxos livres, baixa tolerância à água e incapacidade de reciclar o catalisador (Marinkovic *et al.*, 2015).

Figura 3: Fluxograma geral da produção do biodiesel de palma



Fonte: elaboração própria

#### 2.3.4 Produção de etanol a partir do óleo de palma

A produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica emerge como uma das tecnologias mais importantes para a produção sustentável de combustíveis renováveis. O etanol tem uma classificação de octano maior que a gasolina e produz menos emissões, sendo, portanto, amplamente reconhecido como um substituto e/ou aditivo à gasolina (Srimachai *et al.*, 2013).

De acordo com Kumneadkhan *et al.* (2015), em termos químicos de composição, a biomassa de dendê contém predominantemente celulose (40 -50%), hemiceluloses (20 -35%) e lignina (16-29%). A produção de etanol a partir de materiais lignocelulósicos consiste, em geral, em várias etapas, tais como a redução de tamanho e pré-tratamento para a deslignificação, sacarificação para liberar hexoses fermentáveis e pentoses de polissacarídeos, fermentação de açúcar para a produção do etanol e estágio de destilação para separá-lo. Algumas estratégias para pré-tratamento, como micro-ondas, ultrassom, solvente eutético profundo, irradiação e líquidos iônicos podem ser aplicadas para diminuir a recalcitrância da biomassa (Srimachai *et al.*, 2013).

### 3 Metodologia

#### 3.1 Estratégias de buscas

Para a elaboração do *roadmap* tecnológico, foram consultados artigos científicos relacionados ao aproveitamento energético dos resíduos provenientes do óleo de palma. A base de busca dos artigos científicos utilizada foi o Scopus. Para a busca dos artigos foram utilizadas palavras-chaves combinadas com o objetivo de garantir a efetividade das buscas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Conjunto de palavras-chave utilizadas

<b>Óleo de palma</b>	<b>Processo de Aproveitamento</b>	<b>Aproveitamento Energético</b>
palm oil	biogas	energetic valorization
efluente	anaerobic digestion	energetic evaluation
wastewater	biomethane	energy use
	pyrolysis	
	combustion	
	biodiesel	

Foram encontrados e analisados 81 artigos científicos. Para a elaboração do *roadmap*, buscou-se, dentre os 81 artigos científicos, somente aqueles em que os autores realizaram experimentos de processamento de óleo de palma, a fim de que os dados pudessem ser avaliados. Sendo assim, foram identificados 16 artigos científicos adequados para a construção do *roadmap* tecnológico.

#### 3.2 Análise Macro

Na análise de nível macro, avaliou-se os artigos científicos a partir de 2019 até o ano de 2022. Por fim, realizou-se uma análise quanto aos países de origem dos autores.

#### 3.3 Análise Meso

Esse tipo de análise identifica os fatores mais importantes com relação ao tema em estudo. A seleção desses fatores conceberá o *Roadmap*.

### **3.4 Análise Micro**

Essa análise tem como objetivo aprofundar as taxonomias definidas na análise meso, apresentando as particularidades dessa análise de acordo com o tema estudado.

De acordo com Yen *et al.* (2014), o biogás contém 60% (v/v) - 65% (v/v) de metano, dessa forma, o volume de biogás foi calculado com base na concentração volumétrica de 60% de metano.

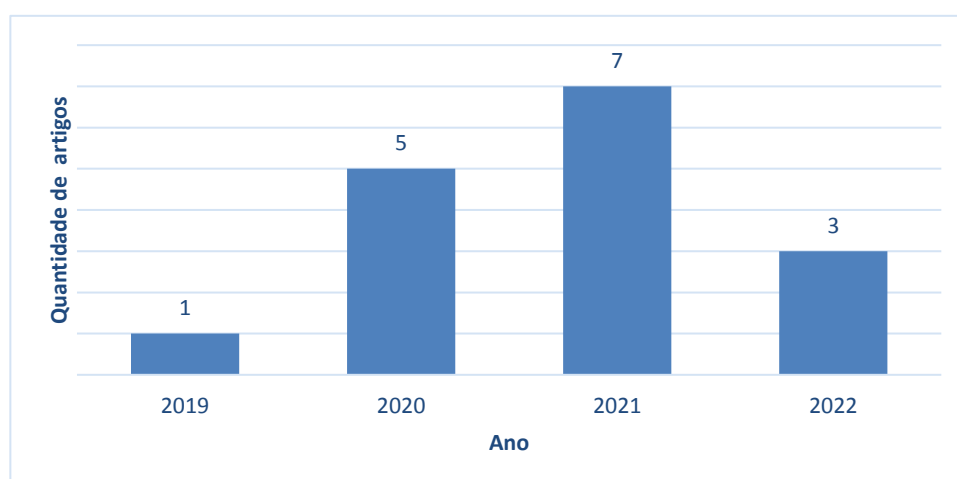
## 4 Resultados

A seguir, de acordo com os artigos abordados, são apresentados os resultados referentes ao aproveitamento energético para o resíduo do óleo de palma. Os resultados serão discutidos com base em uma análise de 3 níveis.

### 4.1 Análise Macro

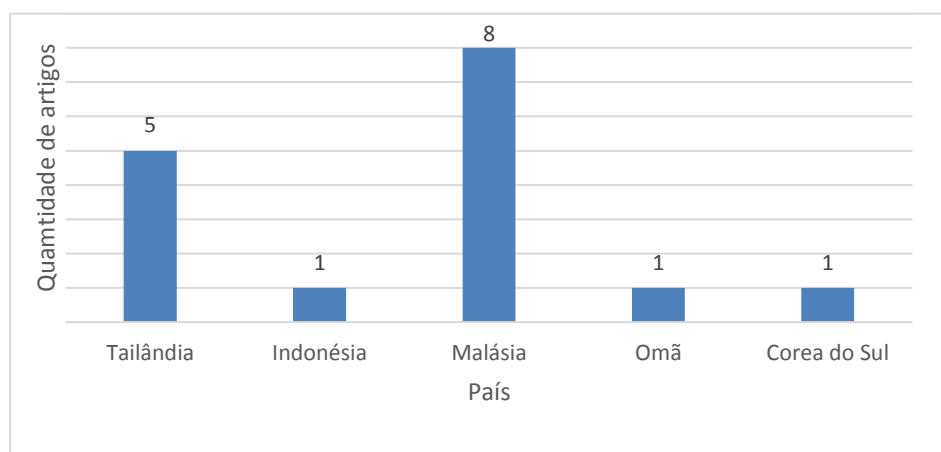
Os artigos estudados foram limitados quanto ao ano de publicação e ao país dos autores, conforme mostram as Figuras 4 e 5, respectivamente. Analisando-se apenas publicações recentes, publicadas a partir de 2019, pode-se se verificar o estado da arte atual de utilização do óleo de palma e seus resíduos.

Figura 4: Quantidade de artigos estudados por ano



Fonte: elaboração própria

Figura 5: Quantidade de artigos estudados por países



Fonte: elaboração própria



A Figura 5 mostra que a maioria dos artigos analisados são provenientes da Malásia. Isso se deve ao fato do governo estar revisando continuamente sua política energética para garantir a sustentabilidade dos recursos energéticos devido ao aumento da demanda de energia. Além disso, a Malásia tornou-se recentemente um dos países mais importantes da tecnologia de biocombustíveis no mundo, devido às suas enormes plantações de árvores de palma, uma fonte de produção de biocombustíveis. Por fim, há uma fonte abundante de biomassa na Malásia a partir de culturas agrícolas e águas residuais da atividade industrial que podem ser utilizadas como estoque para produção de bioenergia.

## 4.2 Análise Meso

As taxonomias analisadas estão definidas na Tabela 2. Esses parâmetros foram escolhidos por exprimirem as condições operacionais utilizadas no aproveitamento energético do óleo de palma, assim como o estado tecnológico do estudo, em especial se a tecnologia já está sendo aplicada a nível próximo ao industrial.

Tabela 2: Taxonomias da análise meso

Fatores estudados
<ul style="list-style-type: none"><li>• Tecnologia de degradação</li><li>• Temperatura</li><li>• Aproveitamento energético</li><li>• Tempo de processo</li><li>• Volume do reator</li></ul>

## 4.3 Análise Micro

Na análise micro, os artigos foram analisados individualmente com relação às taxonomias previamente definidas na análise meso. O volume de biogás foi calculado através da razão do volume de metano produzido por 60% de sua concentração no biogás. Ademais, alguns dados importantes não foram fornecidos nos artigos estudados, o que inviabilizou o êxito de uma análise comparativa entre os fatores de estudo da análise meso.

### 4.3.1 Aproveitamento Energético

#### 4.3.1.1 Biogás

Pelas características do óleo de palma, constata-se que os cachos vazios de frutas são ricos em matéria orgânica, em que a celulose é o mais abundante carboidrato natural presente com

percentual em peso na faixa de 20 a 60%, seguido pela lignina, a qual possui 18 a 50% de percentual em peso e, por fim, a hemicelulose, na faixa de 17 a 31% (Sulaiman *et al.*, 2011). Tanto a celulose quanto a hemicelulose podem ser usadas como substrato para a produção de metano por digestão anaeróbia. O uso da digestão anaeróbia a partir da POME converte os constituintes desse efluente (restos de carboidratos, proteína e ácidos graxos) em biogás através da interação de microrganismos e outros fatores que influenciam a taxa de sua produção.

De acordo com Mamimin *et al.* (2015), a digestão anaeróbia de dois estágios tem vantagens, tais como o aumento de balanço energético líquido, aumento da estabilidade com melhor controle da fase ácida, maiores taxas de carga orgânica, aumento da atividade específica de metanogênios levando a um aumento nas taxas de produção de metano, e aumento da DQO comparada ao processo de digestão anaeróbia de um estágio. Nesse sentido, cabe destacar o estudo realizado por Sani *et al.* (2020), os quais investigaram a digestão anaeróbia de POME realizada em dois estágios. Este estudo teve como objetivo investigar o potencial de biohidrogênio e do biometano do efluente de fábrica de óleo de palma sob condições termofílicas, a 55 °C. A investigação revelou que o rendimento energético da combinação de metano e hidrogênio obtido a partir da digestão anaeróbia de dois estágios foi aproximadamente 38,95% maior do que a digestão anaeróbica de estágio único. Os resultados revelaram que o maior rendimento de hidrogênio foi de 86 mL-H<sub>2</sub>/g-COD adicionado, que foi gerado no HRT de 3 dias, enquanto a maior produção de metano foi obtida no HRT ao longo de 35 dias, com um rendimento de 250,33 mL-CH<sub>4</sub>/g COD – adicionado. Os resultados revelaram que o maior rendimento de hidrogênio foi de 86 mL-H<sub>2</sub>/g-DQO adicionado, que foi gerado no TRH de 3 dias, enquanto a maior produção de metano foi obtida no TRH ao longo de 35 dias, com um rendimento de 250,33 mL-CH<sub>4</sub>/g-DQO – adicionado.

De acordo com os autores, essa técnica é um método promissor para a conversão dos resíduos, pois ela permite um melhor aproveitamento do substrato colhido localmente, POME, levando a menos resíduos não digeridos e a mais geração de energia para uma melhor economia.

Relata-se que a Tailândia exportou cerca de 133.998 toneladas de atum enlatado processado durante janeiro a março de 2020 (o *Bureau of Agricultural and Industrial Trade Promotion* - Departamento de Promoção do Comércio Internacional). Portanto, enormes quantidades de resíduos de atum são produzidas nesse tipo de indústria. Além disso, águas residuais são subprodutos da indústria de processamento de atum e se tornaram um grave problema ambiental. Diante desse cenário, Hussaro (2021) promoveu o estudo dos efeitos na

produção de biogás usando diferentes proporções de mistura do efluente do processo do atum (TW), do biochar da casca de dendê (OB) e dos dejetos de elefantes (EM) e de frangos (CM), ambos dejetos sendo utilizados como inóculos. Essa mistura foi proveniente da co-digestão em batelada de um reator ASBR de 250 L cuja temperatura de processo foi 35 °C e tempo de retenção de 55 dias. As proporções utilizadas foram (TW/OB/EM/CM) 5:1:1:1, 5:1:1:2, 5:1:1:3, 5:1:1:4 e 5:1:1:0. Cada uma dessas razões mássicas foi analisada em cinco digestores diferentes. A razão 5:1:1:2 gerou a maior produção acumulada de biogás, 3,694.88 L. Além disso, o autor concluiu que essa proporção aumentou mais de 25% da produção de biogás comparada à proporção 5:1:1:0, 5% a mais comparada à proporção 5:1:1:3, 20% a mais comparada à proporção 5:1:1:1, 25% a mais comparado à proporção 5:1:1:0 e 30% a mais comparada à proporção 5:1:1:4.

A mistura digerida em batelada em um reator ASBR. gerou um maior valor de produção de biogás, 3694,88 L, cujo valor refere-se a uma faixa de 35°C.

A digestão anaeróbia usando resíduos alimentares como substrato tem um grande problema no qual diversas vezes ela falha na geração de condições ácidas devido ao acúmulo de ácidos graxos voláteis, o que não é ideal para geração de metano por metanogênios. Além disso, os resíduos alimentares possuem uma alta heterogeneidade com diversas composições de proteínas, lipídios, celulose, hemicelulose, lignina, ácidos orgânicos, vitaminas e minerais. Essa variação de matéria-prima muitas vezes resulta em instabilidade e baixa eficiência de produção de biogás em sistemas de digestão anaeróbia. Para superar esse problema, o consórcio de microrganismos no ambiente da digestão precisa ser ajustado e otimizado por meio de um processo chamado aclimação. Nesse aspecto, o estudo realizado por Tirapanampai *et al.* (2022) analisou o emprego da POME como inóculo inicial, investigando a aclimação em três estratégias com base na taxa em que as razões de resíduos alimentares e o meio de aclimação aumentaram em relação à quantidade de ácido acumulado no sistema. Sendo assim, o autor dividiu a aclimação em aclimação de baixa, média e alta taxa. O resultado mostrou que a baixa aclimação foi uma estratégia bem-sucedida para se adaptar ao comportamento de consumo dos microrganismos dentro do sistema de digestão anaeróbica. Os experimentos foram realizados a uma temperatura de 33°C em um reator batelada cujo volume foi de 5 L. A baixa aclimação gerou um volume de biogás de 12,5 L após o tempo da aclimatização total de 120 dias. Em suma, a estratégia de aclimação desenvolvida neste estudo apresentou um potencial promissor para ser utilizado como método alternativo de gestão de resíduos, bem como fonte de energia sustentável devido à produção eficiente de gás metano, utilizando resíduos de alimentos como o substrato.

A produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de POME com EFB foi investigada sob condição mesofílica, 28 °C por Park (2020). Este trabalho teve como objetivo identificar o potencial do biogás proveniente da POME em gás bio-GNV purificado. Segundo o autor, a adição de EFB melhorou a produção de biogás. A composição do POME tinha um teor total de carboidratos de 8,76 g/L, sólido total de 4,93% e sólidos voláteis de 4,07%. Por outro lado, a composição do EFB tinha um teor de carbono de 50,1%, 43,30% de celulose, 26,20% de hemicelulose e 30,50% de lignina. Como um dos resultados obtidos, a produção de gás metano por co-digestão aumentou aproximadamente 30%. Além disso, o estudo relatou que a eficiência de remoção de DQO alcançada foi de cerca de 97,8%. Através de um reator CSTR de volume equivalente a 1000 L, o volume de biogás obtido foi 108.333 L/h, com um tempo de retenção hidráulico de 28 dias a partir de uma fração mássica de 0,25 (massa de POME mais massa de EFB).

#### 4.3.1.2 Biodiesel

De acordo com o artigo de Davies *et al.* (2020), uma alternativa potencial para fazer o uso econômico da POME se dá através do processo de extração-esterificação em etapa única para produzir biodiesel a partir do efluente proveniente de uma fábrica de óleo de palma usando aquecimento de micro-ondas. De acordo com os princípios da economia circular, isso fornece uma rota para extrair ainda mais valor de um resíduo industrial. Os ácidos graxos presentes na POME são extraídos e, posteriormente, esterificados *in situ* para ésteres de metila adequados para o uso como biodiesel. A extração simultânea e a esterificação resultam em um rendimento de 89% de biodiesel dos ácidos graxos disponíveis nos sólidos da POME. A conversão do efluente do óleo de palma no biocombustível aconteceu a uma temperatura de 150 °C durante um tempo de 15 minutos. Em suma, os autores concluíram que essa reação de alta eficiência poderia fornecer um método para obter grandes quantidades de biodiesel a partir do efluente do óleo de palma, o que, na verdade, acabaria reduzindo o impacto ambiental dos ácidos graxos da POME.

Além disso, é possível observar estudos referentes à avaliação do processo de síntese de biodiesel de palma refinado através da transesterificação utilizando catálise heterogênea conforme o artigo científico de Sho *et al.* (2022). Os autores avaliaram a cinza volante heterogênea de óleo de palma impregnada com óxido de cálcio (CaO) para a síntese de biodiesel de óleo de palma refinado. O escopo do trabalho incluiu efeitos paramétricos, cinética, propriedades do combustível e reutilização do catalisador, que não foram relatados até o momento para o biodiesel de palma refinado. Nesse estudo, o uso de catalisador

heterogêneo, tal como o catalisador à base de óxido de cálcio (CaO), tem sido defendido como uma tecnologia promissora para abordar as limitações de catalisadores. Obteve-se um rendimento de biodiesel de 88,58%, cujas condições de transesterificação que resultaram nesse valor correspondem a uma temperatura de reação de 55 °C e a um tempo de reação de 5 horas.

O estudo de Rachmadona *et al.* (2022) utilizou o óleo ácido de palma e o bioetanol parcialmente concentrado a partir da destilação de seiva de palma artificial como matéria-prima para a produção de biodiesel. Essa integração, combinada com o carbono ativado da casca de coco, produziu éster etílico de ácido graxo. A lipase de *Thermomyces lanuginosus* (TLL), imobilizada no carvão da casca de coco, serviu como biocatalisador na reação de transesterificação. Após 48 horas em bioetanol (63% v/v), obtido a partir da destilação de seiva artificial de palmeira, 500 mg de TLL, esterificação a 40 °C e 35 rpm produziu 98,1% m/m de éster etílico de ácidos graxos.

#### 4.3.1.3 Eletrólise

O estudo produzido por Desmiarti *et al.* (2020), direcionado ao aproveitamento energético através da eletrólise, mostrou que é possível acelerar a eficiência de remoção da demanda química de oxigênio (DQO) ao se utilizar a descarga do plasma em barreira dielétrica na produção de biogás. Constatou-se que o aumento da tensão aplicada está diretamente relacionado ao aumento da conversão de POME, à redução da DQO na faixa entre 48,9% e 53,7% e à redução da demanda bioquímica de oxigênio na faixa entre 30% e 40% quando a tensão aplicada foi de 15 a 25 kV. Além disso, o processo, o qual foi realizado em modo batelada, gerou um volume de biogás equivalente a 32 L. Tal valor foi obtido quando aplicou-se a maior tensão, 25 kV.

#### 4.3.1.4 Etanol

O artigo do Instituto de Tecnologia de Bandung, na Indonésia (Gumilar *et al.*, 2022), avaliou o efeito da presença de molibdênio e níquel no processo de tratamento anaeróbico de efluentes na formação de etanol. A eficiência da formação do bioetanol é influenciada por vários fatores, incluindo a presença de micronutrientes como molibdênio e níquel, ainda que em pequenas quantidades. Demirel *et al.* (2010) relataram que a adição de elementos de traço, tais como Ferro, Molibdênio, Níquel, Cobalto etc. podem influenciar positivamente o processo anaeróbico. O uso exclusivo da POME como substrato, por sua vez, já não exerce essa influência. Um elemento de rastreamento é uma parte essencial das enzimas como

cofator no estágio do processo anaeróbico, o qual afeta diretamente o desempenho dos microrganismos, e pode aumentar a eficiência no sistema anaeróbico. Dessa forma, no estudo de Gumilar *et al.* (2022), através de concentrações de 0,25 mg/L de Níquel e de 3 mg/L de Molibdênio, obteve-se uma maior concentração de etanol cujo valor foi de 578,44 mg-DQO/L, o qual foi superior, quando comparado ao valor obtido da produção do mesmo álcool sem adição de íons metálicos.

#### 4.3.2 Volume de reator

Com o objetivo de avaliar o estado tecnológico da produção de biogás, os volumes dos reatores dos artigos relacionados à produção de biogás foram normalizados e atribuídos em três tipos de categorias as quais definem o tipo de escala de produção conforme mostra a Tabela 3. A normalização foi calculada tendo como base a razão dos volumes de biogás produzidos pelos seus respectivos volumes de reator.

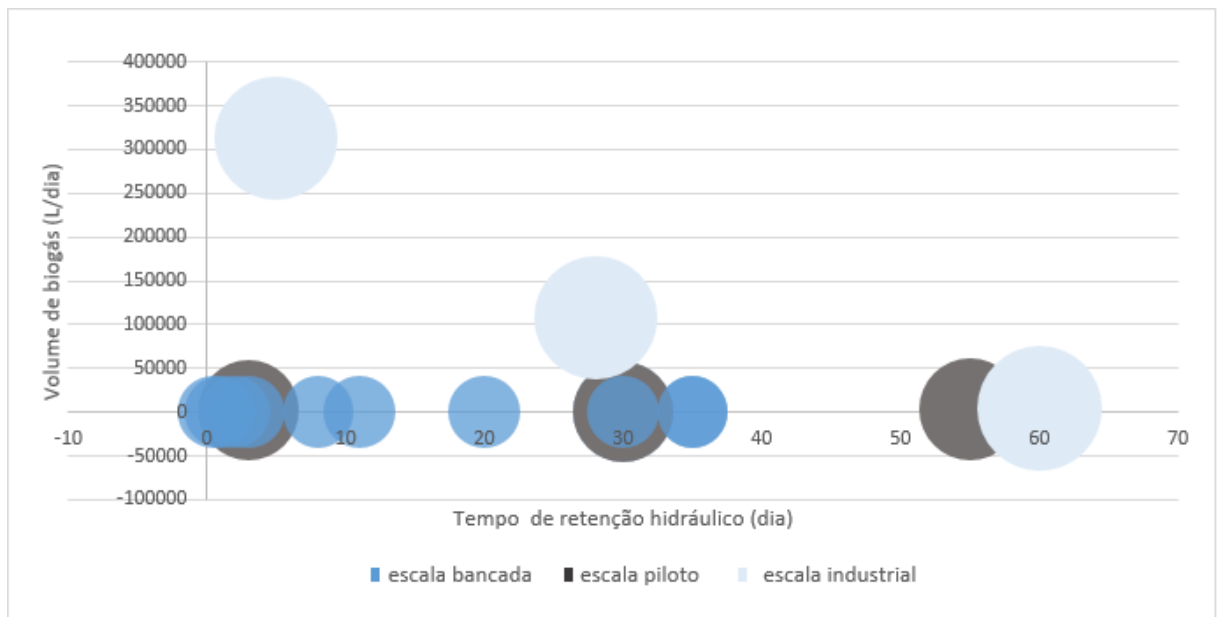
A Figura 6 apresenta a relação entre o volume de biogás, o tempo de retenção hidráulico e a distribuição dos tipos de escala de produção que se referem aos círculos representados no gráfico dessa figura.

Tabela 3: Normalização dos volumes de biogás

<b>Intervalo de volume (L) dos reatores</b>	<b>Categoria do reator</b>	<b>Escala</b>
1 – 10	1	Bancada
10 – 50	2	Piloto
Acima de 50	3	Industrial

*Fonte:* elaboração própria

Figura 6: Parâmetros operacionais da produção do biogás



Fonte: elaboração própria

A normalização do volume de biogás resultou que 56% dos estudos relacionados à produção de biogás podem ser analisados como escala de bancada, 25% como escala piloto e 19% como escala industrial.

Hussaro (2020), ao investigar os efeitos do óleo de palma do biochar da casca para o efluente de atum na produção de biogás, utilizou um reator ASBR cujo volume possuía 250 L. Segundo o autor, esse tipo de reator pode ser aplicado tanto em escala industrial quanto em escala piloto com tratamento de efluentes, devido à eficiência em operação estável de digestão anaeróbia. A razão entre o volume gerado de biogás obtido, 3694,88 L pelo volume do reator, 250 L resulta, de acordo com a tabela 3, em um reator de categoria de escala piloto.

Suksong *et al.*, (2019) investigaram o acoplamento de um reator de digestão anaeróbia de estado líquido e um reator de digestão anaeróbia de estado sólido para produção de biogás a partir de POME e EFB. Com base nisso, os autores avaliaram o efeito da taxa de reciclo do POME que desempenhou a função de inóculo para a produção de biogás a partir do EFB. A mistura de 11 g-VS/L de EFB e de 22,2 mL/Ld de POME foi alimentada em um reator CSTR de 5 L de digestão anaeróbia para estado sólido cujo tempo de retenção hidráulico foi de 30 dias e cuja temperatura de operação foi 40 °C. Uma vez que o efluente líquido da digestão anaeróbia é capaz de melhorar a preservação de microrganismos, nutrientes e capacidade de tampão. A taxa ótima de reciclo de POME foi 16,7 mL/Ld. Dessa forma, produção de biogás obtida foi 3,5 L/d.

Por outro lado, o estudo de Kamal *et. al* (2021) teve como objetivo realizar testes em batelada de digestão anaeróbica com razões diferentes de POME e EFB para caracterizar parâmetros importantes para a mistura de ambos em diferentes proporções. O estudo avaliou a produção de biogás contendo uma mistura de POME com 20% de EFB e outra mistura de POME com 40% de EFB. O estudo mostrou que a maior produção de biogás foi gerada pela mistura com 20% de EFB. Nesse sentido, pode-se afirmar que o maior percentual de EFB não se misturou bem com o substrato no digestor (Chaikitkaew *et al.* 2015). Além disso, o casco protetor da EFB e a natureza hidrofóbica permitem que lignina retarde a acessibilidade da celulose a enzimas e a ataques de microrganismos, o que implica em uma degradação mais baixa de celulose e de hemicelulose. Quanto aos parâmetros de processo, os autores utilizaram um reator em batelada cujo volume foi equivalente a 3L, a temperatura de processo foi 40°C, o tempo de retenção hidráulico foi 30 dias. A produção de biogás foi 39,5 L a partir da mistura POME com 20% de EFB.

Além disso, quanto ao modo de operação, pode-se perceber que há um predomínio pela produção em batelada de biogás, uma vez que 56% dos artigos estudados correspondem a esse modo de operação que indica que o estado tecnológico está majoritariamente na academia.

#### 4.3.3 Temperatura de processo

As temperaturas utilizadas nos estudos avaliados se encontram majoritariamente na faixa de temperatura mesofílica para a técnica de biogás. Todavia, é possível perceber que há um valor de temperatura discrepante, uma vez que esse corresponde a uma temperatura termofílica de 70 °C pertinente ao estudo de Wadchasi *et al.* (2021). Wadchasi *et al.* (2021) utilizaram um reator o qual consiste em uma camada externa para digestão em estado líquido da POME e em uma camada interna para digestão em estado sólido de EFB para produção simultânea de biogás. Embora esse valor de temperatura remeta a um maior custo energético, os autores, por outro lado, utilizaram o excesso de calor da digestão anaeróbia da POME transferindo-o para a digestão anaeróbia da camada interna do reator visando uma maior produção de biogás a partir do EFB. No entanto, a produção de biogás média a partir dos cachos vazios foi de 105 mL/g-EFB. Tal valor foi ligeiramente maior do que a obtenção de biogás com EFB tratado com hidróxido de sódio, 104 mL/g-POME.

Segundo Gavala *et al.* (2003), a maioria dos microrganismos opera no intervalo de temperatura que corresponde a faixa mesofílica, em razão da proximidade da temperatura do processo com a temperatura ambiente. Dessa forma, ocorre um menor consumo de energético e uma maior estabilidade do processo. No estudo realizado por Davies *et. al.*, (2020), percebe-



se que a temperatura de 150°C relacionada à produção do biodiesel representa uma alta discrepância com relação aos valores de temperaturas associados aos demais artigos científicos referentes à produção do combustível, isso justifica-se pelo fato do modesto aumento da temperatura de reação usada na reação de micro-ondas de 100 °C para 150 °C o qual resulta em uma concentração significativamente maior de ésteres metílicos de ácidos graxos. Os 50 °C adicionais em temperatura de reação entre as duas reações de micro-ondas tem um grande efeito sobre a concentração de ésteres metílicos de ácidos graxos. Por fim, uma vez que a busca por artigos científicos retornou apenas um artigo tanto para a técnica de eletrólise quanto para a de etanol, não há intervalos de temperatura a serem comparados dentro de cada uma dessas técnicas.

Isa *et al.* (2020) realizaram um estudo do pré-tratamento por ultrassom da POME como substrato em temperaturas mesofílicas. O ultrassom foi fixado em 16,2 minutos com uma densidade de ultrassônica de 0,88 W/mL. A degradação orgânica máxima foi de 96% com 30°C alimentada com POME sonicada e 91% a 35 °C alimentada com POME não sonicada. Ambos os experimentos foram realizados usando reatores de lote de sequenciamento anaeróbio idênticos. Além disso, o rendimento do metano o qual foi operado num reator AnSBR a 30 °C foi aumentado em 21,5% após o pré-tratamento por ultrassom. Ainda que o autor tenha confirmado que há uma pesquisa limitada com foco em melhorar a produção de biogás de POME por ultrassom em diferentes temperaturas mesofílicas, pode-se concluir que os resultados demonstraram que o tratamento de ultrassom foi um pré-tratamento promissor para afetar positivamente a degradação orgânica e a taxa de produção de biogás em 30-35 °C.

Chai *et al.* (2022) avaliaram a produção de biogás mediante a digestão anaeróbica termofílica do efluente da usina de óleo de palma. Um biorreator fechado de crescimento suspenso anaeróbico foi operado em diferentes tempos de retenção hidráulica (TRH) entre 24 e 8 dias. Foi avaliado o efeito da temperatura de operação no desempenho, identificação microbiana e coeficientes biocinéticos. O desempenho foi quantificado pela produção de biogás e pela eficiência de redução da demanda química de oxigênio (DQO). A produção de biogás por digestão anaeróbia termofílica foi 64,56 L/dia. Esse valor foi superior à produção de biogás por digestão anaeróbia mesofílica, 46,76 L/dia, de um estudo anterior realizado por Wong *et al.* (2014). Outra constatação foi que as comunidades microbianas identificadas através do 16S rDNA relataram mais espécies de bactérias metanogênicas no processo termofílico em comparação ao processo mesofílico.

## 5 Conclusões e trabalhos futuros

Com base nesse trabalho, percebe-se que o resíduo do óleo de palma representa uma alternativa como fonte de produção de biocombustíveis. Além disso, constata-se que os países cujos autores possuem mais publicações de artigos científicos são aqueles que detêm as maiores produções mundiais de óleo de palma, tais como Malásia e Tailândia, ambos do continente asiático.

Dentre as conclusões relacionadas à análise meso, pode-se frisar os seguintes aspectos:

- Dentre os biocombustíveis, o trabalho evidencia um maior número de estudos realizados que visam a obtenção de biogás;
- De acordo com a definição das escalas de produção do biogás, há um majoritário campo de estudos em escala de bancada;

Sob a ótica da relevância, o tema do presente trabalho corrobora com a manutenção de uma sociedade mais sustentável, tendo em vista que os resíduos de óleo de palma caracterizam-se pelo alto teor de sólidos e, principalmente, de matérias graxas. Por isso, torna-se importante o estudo dos tratamentos adequados para reduzir os impactos ambientais.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se analisar algumas das biomassas provenientes do processamento do óleo de palma como as fibras de palma e a torta do decantador. Além disso, propõe-se analisar o processo de pirólise dos resíduos do óleo de palma e outras tecnologias emergentes.

## REFERÊNCIAS

- ABNISA, F. *et al.* Characterization of Bio-oil and Bio-char from Pyrolysis of Palm Oil Wastes. **BioEnergy Research**, v. 6, p. 830-840, fev. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-013-9313-8>.
- AHMAD, A.; BHAT, A. H.; BUANG, A. Renewable and sustainable bioenergy production from microalgal co-cultivation with palm oil mill effluent (POME): A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 214-234, nov. 2016. Disponível em: [Renewable and sustainable bioenergy production from microalgal co-cultivation with palm oil mill effluent \(POME\) - A review | Elsevier Enhanced Reader](#).
- AHMAD, A.; REDDY, S. Performance evaluation of upflow anaerobic sludge blanket reactor using immobilized ZnO nanoparticle enhanced continuous biogas production. **Energy & Environment**, v. 31, ago. 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/334946979\\_Performance\\_evaluation\\_of\\_upflow\\_an\\_aerobic\\_sludge\\_blanket\\_reactor\\_using\\_immobilized\\_ZnO\\_nanoparticle\\_enhanced\\_continuuous\\_biogas\\_production](https://www.researchgate.net/publication/334946979_Performance_evaluation_of_upflow_an_aerobic_sludge_blanket_reactor_using_immobilized_ZnO_nanoparticle_enhanced_continuuous_biogas_production).
- AL-SABAEI, A. M. *et al.* Utilization of palm oil and its by-products in bio-asphalt and bio-concrete mixtures: A review. **Construction and Building Materials**, v. 337, jun. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822012284>.
- ANYAOHA, K.; ZHANG, L. Transition from fossil-fuel to renewable-energy-based smallholder bioeconomy: Techno-economic analyses of two oil palm production systems. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 10, maio 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266682112200031X>.
- CHAI, A. Effect of operating temperature in the anaerobic degradation of palm oil mill effluent: Process performance, microbial community, and biokinetic evaluation. **Chemical Papers**, v. 76, p. 5399-5410, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11696-022-02247-4>.
- CHAIKITKAEW, S.; KONGJAN, P.; O-THONG, S. Biogas Production from Biomass Residues of Palm Oil Mill by Solid State Anaerobic Digestion. **Energy Procedia**, v. 79, p. 838-844, nov. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215023073>.
- CHAN, YI J.; LEE, WY H.; SELVARAJOO, A. Comparative study of the synergistic effect of decanter cake (DC) and empty fruit bunch (EFB) as the co-substrates in the anaerobic co-digestion (ACD) of palm oil mill effluent (POME). **Environmental Challenges**, v. 5, dez. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010021002365>.
- CHONG, M. F.; POH, P. E. Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 1-9, jan. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852408005427>.
- DAVIES, E.; DEUTZ, P.; ZEIN, S. H. Single-step extraction–esterification process to produce biodiesel from palm oil mill effluent (POME) using microwave heating: a circular

economy approach to making use of a difficult waste product. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, p. 2901-2911, 2022. Disponível em: <https://www.scopus.com/home.uri>.

DEMIREL, B.; SCHERER, P. Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 992-998, mar. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953410004769>.

GUMILAR, A. *et al.* Addition of Ni and Mo as an effort to increase ethanol in palm oil wastewater treatment. **International Journal of GEOMATE**, v. 22, n. 91, 2022. Disponível em: <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/3301>.

HO, W. W. S.; NG, H. K.; GAN, S. Biodiesel Synthesis from Refined Palm Oil Using a Calcium Oxide Impregnated Ash-Based Catalyst: Parametric, Kinetics, and Product Characterization Studies. **Catalysts**, v. 12, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/12/7/706/html>.

HUSSARO, K. Effects of Oil Palm Shell Biochar to Tuna Wastewater on Biogas Production and Methane Yield by Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR): Mesophilic Condition. **GMSARN International Journal**, v. 16, p. 331-338, 2022. Disponível em: <http://gmsarnjournal.com/home/wp-content/uploads/2022/01/vol16no4-3.pdf>.

ISA, M. H. *et al.* Improved anaerobic digestion of palm oil mill effluent and biogas production by ultrasonication pretreatment. **Science of Total Environment**, v. 722, jun. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720313450>.

JADHAV, P. *et al.* Application of iron-cobalt-copper (Fe-Co-Cu) trimetallic nanoparticles on anaerobic digestion (AD) for biogas production. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-022-02825-2>.

KAMAL, N. A. *et al.* Analysis of biogas production from biomass residue of palm oil mills using an anaerobic batch test. **UKM Journal Article Repository**, v. 50, n. 12, p. 3583-3592, 2021. Disponível em: <http://journalarticle.ukm.my/18326/>.

KEE LAM, M.; LEE, T. K. Renewable and sustainable bioenergies production from palm oil mill effluent (POME): Win-win strategies toward better environmental protection. **Biotechnology Advances**, v. 29, p. 124-141, jan. - fev. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975010001369>.

MAHMUD, S. S. *et al.* Potential Utilisation of Dark-Fermented Palm Oil Mill Effluent in Continuous Production of Biomethane by Self-Granulated Mixed Culture. **Scientific Reports**, v. 10, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-65702-w>.

MAMIMIN, C. *et al.* Two-stage thermophilic fermentation and mesophilic methanogen process for biohythane production from palm oil mill effluent. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, p. 6319-6328, maio 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319915006679>.

MBA, O. I.; DUMONT, M-J.; NGADI, M. Palm oil: Processing, characterization and utilization in the food industry – A review. **Food Bioscience**, v. 10, p. 26-41, jun. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221242921500005X>.

MOHTAR, S. S. *et al.* An ionic liquid treatment and fractionation of cellulose, hemicellulose and lignin from oil palm empty fruit bunch. **Carbohydrate Polymers**, v. 166, p. 291-299, jun. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861717302400>.

OMAR, A. K. M. *et al.* Waterless sterilization of oil palm fruitlets using supercritical carbon dioxide. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 126, p. 65-71, ago. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0896844616305034>.

PARK, Y. G. Study for the Bio-CNG Recovery of Methane Gas in the Anaerobic Co-digestion Using Malaysian POME (Palm Oil Mill Effluent). **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 26, p. 435-446, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12257-019-0401-2>.

PRASERTSAN, P. *et al.* Enhanced biogas production by co-digestion of crude glycerol and ethanol with palm oil mill effluent and microbial community analysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 148, maio 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096195342100074X>.

PROMRAKSA, A.; RAKMAK, N. Biochar production from palm oil mill residues and application of the biochar to adsorb carbon dioxide. **Heliyon**, v. 6, maio 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240584402030863X>.

PUTRO, L. H. S. View of Emissions of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from Wastewater of Palm Oil Mills: A Real Contribution to Increase the Greenhouse Gas and Its Potential as Renewable Energy Sources. **Environment and Natural resources journal**, v. 20, n. 1, 2022. Disponível em: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/enrj/article/view/245510/166413>.

RACHMADONA, N. *et al.* Integrated bioconversion process for biodiesel production utilizing waste from the palm oil industry. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, jun. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343722004237>.

RITCHIE, H.; ROSER, M. **Palm oil - Our World in Data**. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/palm-oil#:~:text=In%202018%2C%20the%20world%20produced%2072%20million%20tonnes,palm%20oil%20production%20comes%20from%20Indonesia%20and%20Malaysia>.

SANI, K. *et al.* Effectiveness of using two-stage anaerobic digestion to recover bio-energy from high strength palm oil mill effluents with simultaneous treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 39, fev. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714420305390>.

SARITPONGTTEERAKA, K. *et al.* Comparative assessment between hydrothermal treatment and anaerobic digestion as fuel pretreatment for industrial conversion of oil palm empty fruit bunch to methane and electricity-A preparation study to full scale. **Fuel**, v. 310,

fev. 2022. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121023498>.

SHOW, K. Y. *et al.* Integrated Anaerobic/Oxic/Oxic treatment for high strength palm oil mill effluent. **Bioresource Technology**, 2021. Disponível em:  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34271500/>.

SILVA, O. C. da. **Análise do aproveitamento econômico e energético do óleo de palma na Guiné-Bissau na perspectiva do desenvolvimento sustentável**. 1997. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Disponível em:  
<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-18012012-165022/publico/OrlandoCristiano.PDF>.

SILVA, S. M. E. **Investigação sobre o refino físico de óleos vegetais para obtenção de produtos de alta qualidade**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade de Campinas, Campinas, 2013. Disponível em:  
<https://core.ac.uk/download/296869266.pdf>.

SOO, P. L.; BASHIR, M. J. K.; WONG, L.-P. Recent advancements in the treatment of palm oil mill effluent (POME) using anaerobic biofilm reactors: Challenges and future perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 320, out. 2022. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722013238>.

SUKSONG, W. *et al.* Biogas production from palm oil mill effluent and empty fruit bunches by coupled liquid and solid-state anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, v. 296, jan. 2020. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852419315342>.

SUMATHI, S.; CHAI, S. P.; MOHAMED, A. R. Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, p. 2404-2421, dez. 2008. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032107000937>.

SYAFILA, M. Wastewater Processing Technology Opportunities for Palm Oil Mill Effluent as a Raw Material for Renewable Bioenergy. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 54, n. 3, 2022. Disponível em:  
[https://www.academia.edu/82016876/Wastewater\\_Processing\\_Technology\\_Opportunities\\_for\\_Palm\\_Oil\\_Mill\\_Effluent\\_as\\_a\\_Raw\\_Material\\_for\\_Renewable\\_Bioenergy](https://www.academia.edu/82016876/Wastewater_Processing_Technology_Opportunities_for_Palm_Oil_Mill_Effluent_as_a_Raw_Material_for_Renewable_Bioenergy).

TIRAPANAMPAI, C. *et al.* Processing of palm oil mill effluent (POME) into food waste digesting microbes: An investigation of acclimatization strategies. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 52, ago. 2022. Disponível em:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138822003393>.

UMAR, M. S.; JENNINGS, P.; URMEE, T. Sustainable electricity generation from oil palm biomass wastes in Malaysia: An industry survey. **Energy**, v. 67, p. 496-505, abr. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214000899>.

WADCHASIT, P. *et al.* Development of a novel reactor for simultaneous production of biogas from oil-palm empty fruit bunches (EFB) and palm oil mill effluents (POME).

**Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, jun. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221334372100186X>.

YAP, C. C. *et al.* Pilot-Scale Investigation of the Integrated Anaerobic–Aerobic Bioreactor (IAAB) Treating Palm Oil Mill Effluent (POME): Startup and Performance Evaluation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 60, n. 10, p. 3839-3859, 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.0c05878?goto=supporting-info>.